

Analisa Bentuk Profile dan Jumlah Blade Vertical Axis Wind Turbine terhadap Putaran Rotor untuk Menghasilkan Energi Listrik

Saiful Huda dan Irfan Syarif Arief

Jurusan Teknik Sistem Perkapalan, Fakultas Teknologi Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)

Jl. Arief Rahman Hakim, Surabaya 60111 Indonesia

e-mail: irfansya@its.ac.id

Abstrak—Turbin angin adalah suatu alat untuk mengkonversi energi angin menjadi energi mekanik yang kemudian dikonversi lagi menjadi energi listrik. Putaran pada poros turbin angin dihubungkan pada generator untuk menghasilkan energi listrik. Berdasarkan penelitian yang dilakukan sebelumnya, banyak jenis turbin angin yang ditemukan untuk meningkatkan efisiensi dan torsi yang dihasilkan salah satu contohnya adalah vertical axis wind turbine (VAWT). VAWT merupakan turbin angin dengan sumbu vertical atau tegak lurus terhadap tanah. Tujuan dari tugas akhir ini adalah mengetahui seberapa besar pengaruh peningkatan panjang chord, jumlah blade, sudut pitch dari blade terhadap torsi dan efisiensi yang dihasilkan oleh VAWT dengan pendekatan CFD (Computational Fluid Dynamic). Analisa yang dilakukan untuk melihat efek peningkatan panjang chord, jumlah blade dan sudut pitch dari blade. Setelah analisa berakhir kita membandingkan hasil analisa dalam grafik. Hasil dari analisa tersebut adalah torsi terbesar terdapat pada variasi panjang chord 1.5 m dengan sudut pitch 10o dan jumlah blade 4 buah dengan nilai 134.9452198 Nm.

Kata Kunci—Turbin Angin, VAWT, chord, Sudut Pitch, CFD.

I. PENDAHULUAN

ENERGI angin merupakan salah satu potensi energi terbarukan yang dapat memberikan kontribusi signifikan terhadap kebutuhan energi listrik domestik, khususnya wilayah terpencil. Pembangkit energi angin yang biasa disebut Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB) ini bebas polusi dan sumber energinya yaitu angin tersedia di mana pun, maka pembangkit ini dapat menjawab masalah lingkungan hidup dan ketersediaan sumber energi. Prospek pengembangan teknologi ini masih sangat tinggi. Beberapa wilayah di Indonesia disinyalir dapat berkontribusi besar terhadap penggunaan pembangkit listrik tenaga bayu/angin (PLTB). PLTB perlu dikembangkan terutama daerah pantai atau laut, yang memiliki kecepatan angin yang stabil. Energi angin dapat dimanfaatkan dengan menggunakan kincir angin atau wind turbine. Cara kerjanya adalah ketika angin berhembus angin akan membuat rotor berputar karena efek dari bentuk penampang rotor yang berbentuk foil. Kemudian poros rotor tersebut tersambung dengan poros generator. Dengan

berkenbangnya teknologi, maka bentuk dari wind turbine juga berkembang. Salah satunya adalah Vertikal Axis Wind Turbine (VAWT). Dimana keuntungan dari VAWT ini dapat menghasilkan torsi yang lebih besar dari pada torsi yang dihasilkan oleh konvensional wind turbine dan dapat bekerja dengan baik meskipun aliran udara yang berhembus adalah turbulen. Tentunya diperlukan sistem transmisi untuk mentransmisikan daya dan putaran poros ke generator. Untuk itu akan dilakukan penelitian dalam bentuk skripsi untuk mengetahui kinerja dari Vertical Axis Wind Turbine.

Permasalahan-permasalahan yang diangkat dalam penelitian ini, antara lain:

1. Perancangan pembangkit listrik tenaga angin tipe VAWT yang optimal dengan kecepatan angin di pantai Bandalit, Jember, Indonesia.
2. Mencari daya yang dihasilkan oleh pembangkit listrik tenaga bayu.

Sedangkan tujuan dari penelitian ini ialah untuk menjawab pertanyaan di atas.

II. URAIAN PENELITIAN

Berikut ini adalah alur dari kegiatan yang dilakukan untuk menyelesaikan permasalahan dalam penelitian ini:

A. Tahap Telaah

Berbagai literatur digunakan dalam menunjang penelitian. Mulai dari teori terhadap airfoil seperti bentuk profile, tips speed ratio, gaya lift, gaya drag, solidity dan hal lainnya. Selain itu, dicari pula literatur terhadap rumus dan nilai gaya lift, gaya drag, power dan torsi yang terjadi pada vertical axis wind turbine.

B. Pengumpulan data

Merupakan tahap dimana mengumpulkan data seperti variasi model dan lain lain. Kemudian didapatkan data sebagai berikut :design kecepatan angin 3 m/s dan jumlah rumah penduduk 50 rumah. Data lainnya menggunakan asumsi/variasi. Variasi yang dilakukan yaitu pada variasi sudut pitch blade (10°,11°), dengan panjang chord 1,5 m dan 2 m dan variasi Jumlah blade 3 dan 4 buah.

C. Perancangan VAWT

Merupakan Tahap dimana dilakukan perancangan dimensi blade dari VAWT, analisa gaya, torsi, power yang dihasilkan oleh VAWT sebelum dilakukan penggambaran model.

D. Penggambaran Model

Pada tahap ini dilakukan penggambaran model blade dari VAWT dengan menggunakan software CFD (Computational Fluid Dynamic). Tahapannya yaitu penggambaran blade dari VAWT, pemberian surface pada model, pembuatan boundary dan pemberian nama part.

E. CFD Simulation

Setelah dilakukan penggambaran model berdasarkan perhitungan, maka diperiksa gaya, torsi, efisiensi dan power yang dihasilkan oleh VAWT dengan bantuan simulasi CFD untuk validasi perhitungan yang telah dilakukan

F. Analysis

Setelah model digambar di software CFD, maka dilakukan analisa terhadap gaya lift dan gaya drag yang dihasilkan oleh blade VAWT yang dipengaruhi oleh bentuk profile dari blade itu sendiri. Disini dicari torsi, efisiensi dan power yang dihasilkan oleh VAWT.

G. Pengambilan Kesimpulan

Apabila perhitungan dan analisa dapat diterima, maka langsung dapat diambil kesimpulan semua analisa tersebut diatas tentang bagaimana rancangan vertical axis wind turbine yang paling optimal.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Perhitungan Awal

Jumlah rumah penduduk berjumlah 50 rumah yang tersebar di dekat pantai. Diasumsikan masing-masing rumah disuplai dengan sumber energi listrik 450 W. Sehingga total kebutuhan daya didaerah tersebut adalah $450 \times 50 = 2250$ W.

Kemudian dilakukan perhitungan awal berdasarkan data yang didapatkan. Minimum daya yang dapat diekstraksi dari angin adalah, $P_{mw} = 800$ W. Kecepatan angin minimum untuk dapat mengekstraksi daya tersebut v_{mw} (m/s) = 2 m/s. Untuk stabilitas, rasio diameter terhadap tinggi blade $D/H = 1.2$, $D = 1.2 \times H$.

$$A_{swept} = \pi \times D \times H = 1.2 \times \pi \times H^2$$

$$P_{mw} = 0.5 \times \rho_{udara} \times A_{swept} \times V^3$$

$$800 = 0.5 \times 1.225 \times 1.2 \times \pi \times H^2 \times V^3$$

$$800 = 18.4632 \times H^2$$

Sehingga dapat dihitung,

$$H = (800/18.4632)^{0.5}$$

$$H = 6.58251 \text{ m.}$$

Sehingga diameter (D) dari VAWT dapat dihitung yaitu :

$$D = 1.2 \times H$$

$$D = 7.899012 \text{ m.}$$

Maka dapat ditentukan bahwa tinggi dari blade, $H = 6.5$ m dan diameter dari VAWT, $D = 8$ m. Sehingga $D/H = 7.9/6.5 = 1.23$. Kemudian besarnya luasan daerah yang tersapu oleh blade dapat diketahui dengan menggunakan rumus :

$$A_{swept} = \pi \times D \times H$$

$$A_{swept} = 3.14 \times 7.9 \times 6.5$$

$$A_{swept} = 163.28 \text{ m}^2.$$

Dari data kecepatan angin, dapat diketahui bahwa kecepatan angin rata-rata adalah 3 m/s. Maka daya yang diekstraksi sebenarnya pada kecepatan angin, $v = 3$ m/s sesuai dengan rumus 2.10 adalah :

$$P_w = 0.5 \times \rho_{udara} \times A_{swept} \times V^3$$

$$P_w = 0.5 \times 1.225 \times 163.28 \times 27$$

$$P_w = 2700.243 \text{ W}$$

Kemudian diasumsikan tips speed ratio (TSR), $\lambda = 1.6$, maka Efisiensi wind turbine dapat diketahui dengan menggunakan rumus 2.19:

$$\eta_{wt} = 0.055\lambda + 0.399$$

$$\eta_{wt} = (0.055 \times 1.6) + 0.399$$

$$\eta_{wt} = 0.487$$

$$\eta_{wt} = 48.7 \%$$

Sehingga didapatkan efisiensi wind turbine, $\eta_{wt} = 48.7 \%$.

Kemudian daya pada poros turbin, P_T dapat diketahui dengan menggunakan rumus 2.13 sebagai berikut :

$$P_T = P_w \times \eta_{wt}$$

$$P_T = 2700.243 \times 48.7\%$$

$$P_T = 1315.018 \text{ W.}$$

Diasumsikan efisiensi generator, $\eta_{generator} = 0.8$. Maka daya elektrik yang dihasilkan generator sesuai dengan rumus 2.14 adalah :

$$P_{elektris} = P_T \times \eta_{generator}$$

$$P_{elektris} = 1315.018 \times 0.8$$

$$P_{elektris} = 1052.015 \text{ W.}$$

Kemudian kecepatan rotasi turbin dapat diketahui dengan menggunakan rumus 2.15 berikut :

$$\omega = (\lambda \times v/R) \times (60/\pi)$$

$$\omega = (1.6 \times 3 / 4) \times (60 / 3.14)$$

$$\omega = 11.46497 \text{ rpm.}$$

Kemudian besarnya torsi yang dihasilkan dapat diketahui dengan menggunakan rumus sebagai berikut :

$$T = P_T / \omega$$

$$T = 1315.018 / 11.46497$$

$$T = 114.6988 \text{ Nm.}$$

Kemudian memeriksa nilai tips speed ratio (TSR) dengan menggunakan rumus 2.15 sebagai berikut :

$$\lambda = \omega \times R \times 2\pi / (v \times 60)$$

$$\lambda = 11.46497 \times 4 \times 2 \times 3.14 / (3 \times 60)$$

$$\lambda = 1.6$$

Kemudian dapat dilakukan perhitungan panjang chord. Besarnya nilai solidity (σ) minimum untuk VAWT adalah 0.4, maka panjang chord minimum untuk jumlah blade 3 buah dapat diketahui dengan menggunakan rumus 2.22 sebagai berikut :

$$\sigma = NB \times C / D$$

$$0.4 = 3 \times C / 8$$

$$C = 0.4 \times 8 / 3$$

$$C = 1.067 \text{ m.}$$

Maka dapat diambil nilai untuk panjang chord adalah 1.5 m dan 2 m.

B. Perhitungan Gaya pada VAWT

Dari simulasi hasil yang didapatkan berupa besarnya gaya lift dan gaya drag. Sebagai contoh pada variasi panjang chord 1.5 m, sudut pitch 10° , didapatkan gaya lift sebesar 130.9687 N dan gaya drag 23.3231 N. Untuk itu besarnya koefisien lift dan koefisien drag dapat diketahui bersarkan rumus 2.1 dan 2.2 yaitu :

Koefisien lift

$$F_L = \frac{1}{2} C_L \rho A_{blade} v^2$$

$$130.9687 = \frac{1}{2} \times C_L \times 1.225 \times 20.0583 \times 3^2$$

$$C_L = 1.1844711981$$

Koefisien Drag

$$F_D = \frac{1}{2} C_D \rho A_{blade} v^2$$

$$23.3231 = \frac{1}{2} C_D \times 1.225 \times 20.0583 \times 3^2$$

$$C_D = 0.210933$$

Sehingga koefisien tangensial dapat dihitung dengan menggunakan rumus 2.4 sebagai berikut :

$$C_t = C_l \sin \alpha - C_d \cos \alpha$$

$$C_t = 1.1844711981 \sin 10 - 0.210933 \cos 10$$

$$C_t = (1.1844711981 \times 0.174) - (0.210933 \times 0.985)$$

$$C_t = 0.09995$$

Torsi yang dihasilkan dapat dihitung dengan menggunakan rumus 2.7 berikut :

$$Q = 0.5 \times \rho \times C \times R \times H \times C_t \times v^2$$

$$Q = 0.5 \times 1.225 \times 1.5 \times 4 \times 6.5 \times 0.09995 \times 3^2$$

$$Q = 21.488 \text{ Nm}$$

Untuk jumlah blade 3 buah, torsi rata-rata yang dihasilkan dapat dihitung dengan menggunakan rumus 2.8 berikut :

$$Q_{av} = \frac{N}{2\pi} Q$$

$$Q_{av} = \frac{3}{2 \times 3.14} 21.488$$

$$Q_{av} = 101.2089 \text{ Nm}$$

C. Data yang diperoleh dari hasil simulasi Variasi

Data yang diperoleh dari hasil simulasi berupa data numeric adalah gaya lift dan gaya drag. Perhitungan gaya torsi ditabulasikan pada table berikut.

Kemudian dari data tersebut dibuat grafik sebagai berikut. Grafik perubahan torsi terhadap jumlah blade berdasarkan sudut pitch pada panjang chord 1.5 m.

Tabel 3.1 Perhitungan pada panjang chord 1.5 m

No	Sudut Pitch ($^\circ$)	F_{lift}	F_{drag}	C_L	C_D	C_T
1	10	130.9687	23.3231	1.184471981	0.210933	0.09995043
2	11	130.2051	25.5227	1.177566034	0.230826	0.05055951

No	Sudut Pitch ($^\circ$)	C_T	Torsi (Nm)
1	10	0.099950427	21.48809233
2	11	0.050559509	10.86966255

Torsi Rata-rata panjang chord 1,5 m

No	Jumlah Blade	Torsi Rata-rata(Nm)
10	3	101.2089149
10	4	134.9452198
11	3	51.1961106
11	4	68.2614808

Tabel 3.2 Perhitungan pada panjang chord 2 m

Panjang chord =		2 m		Ablade	26.7145	
No	Sudut Pitch ($^\circ$)	F_{lift}	F_{drag}	C_L	C_D	C_T
1	10	128.8214	22.8314	0.874766941	0.155038	0.0745337
2	11	131.1992	26.5107	0.890913489	0.180022	0.033015

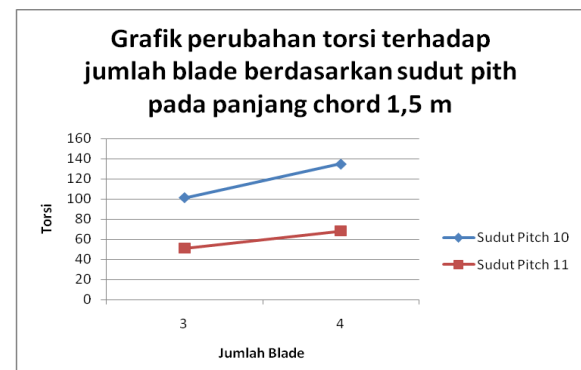
No	Sudut Pitch ($^\circ$)	C_T	Torsi (Nm)
1	10	0.074533702	21.36508568
2	11	0.033015004	9.463751017

Torsi Rata-rata panjang chord 2 m

No	Jumlah Blade	Torsi Rata-rata(Nm)
10	3	100.6295535
10	4	134.1727381
11	3	44.57426729
11	4	59.43235639

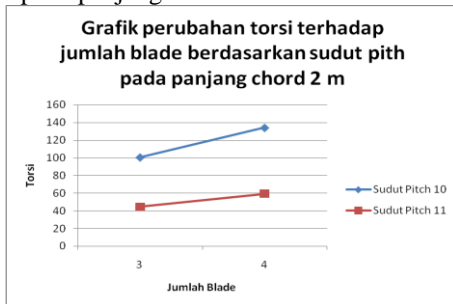
Tabel 3.3 Hasil Perhitungan

No	Sudut Pitch	Panjang Chord	Jumlah Blade	Torsi (Nm)	P_r (Watt)	Efisiensi (%)	P_{rend} (Watt)
1	10	1,5 m	3	101.2089149	1160.357	42.97231715	928.285589
2			4	134.9452198	1547.143	57.29642287	1237.71412
3	11	1,5 m	3	51.1961106	586.9618	21.73736873	469.569422
4			4	68.2614808	782.6157	28.98315831	626.092563
5	10	2 m	3	100.6295535	1153.715	42.72632599	922.971701
6			4	134.1727381	1538.286	56.96843465	1230.62894
7	11	2 m	3	44.57426729	511.0426	18.92579871	408.834044
8			4	59.43235639	681.9901	25.23439828	545.112059



Gambar 3.1 Grafik perubahan torsi terhadap jumlah blade berdasarkan sudut pitch pada panjang chord 1.5 m.

Grafik perubahan torsi terhadap jumlah blade berdasarkan sudut pitch pada panjang chord 2 m.



Gambar 3.2 Grafik perubahan torsi terhadap jumlah blade berdasarkan sudut pitch pada panjang chord 2 m.

Grafik perubahan torsi terhadap jumlah blade berdasarkan panjang chord pada sudut pitch 10°.



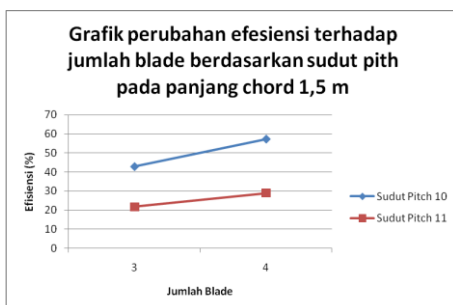
Gambar 3.3 Grafik perubahan torsi terhadap jumlah blade berdasarkan panjang chord pada sudut pitch 10°.

Grafik perubahan torsi terhadap jumlah blade berdasarkan panjang chord pada sudut pitch 11°.



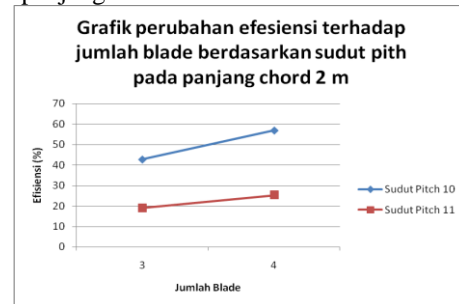
Gambar 3.4 Grafik perubahan torsi terhadap jumlah blade berdasarkan panjang chord pada sudut pitch 11°.

Grafik efisiensi terhadap jumlah blade berdasarkan sudut pitch pada panjang chord 1.5 m.



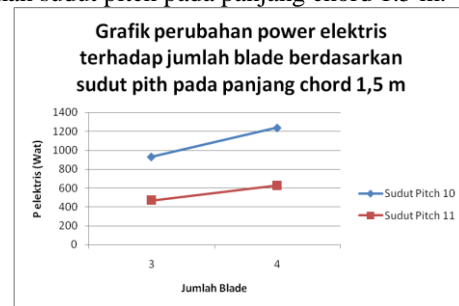
Gambar 3.5 Grafik efisiensi terhadap jumlah blade berdasarkan sudut pitch pada panjang chord 1.5 m.

Grafik efisiensi terhadap jumlah blade berdasarkan sudut pitch pada panjang chord 2 m.



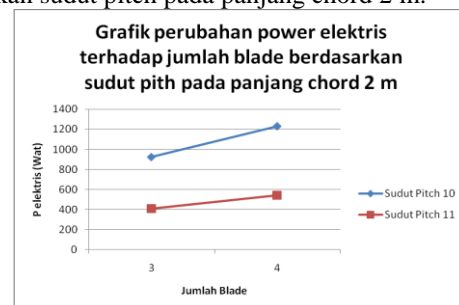
Gambar 3.6 Grafik efisiensi terhadap jumlah blade berdasarkan sudut pitch pada panjang chord 2 m.

Grafik perubahan power listrik terhadap jumlah blade berdasarkan sudut pitch pada panjang chord 1.5 m.



Gambar 3.7 Grafik perubahan power listrik terhadap jumlah blade berdasarkan sudut pitch pada panjang chord 1.5 m.

Grafik perubahan power listrik terhadap jumlah blade berdasarkan sudut pitch pada panjang chord 2 m.



Gambar 3.8 Grafik perubahan power listrik terhadap jumlah blade berdasarkan sudut pitch pada panjang chord 2 m.

Analisa

Dari data-data yang ditabulasikan dalam bentuk table pada sub bab sebelumnya, dapat diketahui bahwa rata-rata daya yang bisa dihasilkan oleh satu turbin angin adalah 1280.5 W. Sementara itu dengan jumlah rumah penduduk sebanyak 50 rumah. Dengan asumsi suplai daya pada masing-masing rumah 450 w. Maka jumlah kebutuhan daya didaerah tersebut adalah :

$$\text{Kebutuhan daya} = 50 \times 450$$

$$\text{Kebutuhan daya} = 22500 \text{ W}$$

$$\text{Jumlah turbin angin} = \frac{\text{Kebutuhan daya}}{\text{Daya 1 turbin angin}}$$

$$\text{Jumlah turbin angin} = \frac{22500}{1237.71412}$$

$$\text{Jumlah turbin angin} = 18.18$$

Untuk memenuhi suplai daya yang dibutuhkan oleh daerah tersebut diperlukan turbin angin sejumlah 19 buah.

Dari tabel tabulasi data yang diperoleh dari pemodelan, dapat dilihat bahwa untuk panjang chord 1.5 m. Peningkatan sudut pitch menyebabkan penurunan pada besaran koefisien lift dan koefisien drag. Sehingga terjadi penurunan pada koefisien tangensial. Sehingga torsi, torsi rata-rata, power turbin dan power elektrik yang dihasilkan turbin juga mengalami penurunan.

Sedangkan untuk panjang chord 2 m. Peningkatan sudut pitch menyebabkan penurunan pada besaran koefisien lift dan peningkatan pada koefisien drag. Namun terjadi penurunan pada koefisien tangensial. Sehingga torsi, torsi rata-rata yang dihasilkan, power turbin dan power elektrik yang dihasilkan turbin juga mengalami penurunan.

Selain itu juga dapat dilihat bahwa pada variasi panjang chord 1.5 m dengan jumlah blade 4 buah dan sudut pitch 10° torsi yang dihasilkan sebesar 134.9452198 Nm, power turbin yang dihasilkan sebesar 1547.143 wat, efisiensi yang dihasilkan sebesar 57.29 % dan power elektrik yang dihasilkan sebesar 1237.71412 wat, lebih besar dibandingkan torsi, power turbin, efisiensi dan power elektrik yang dihasilkan pada variasi panjang chord 2 m dengan jumlah blade 4 buah dan sudut pitch 10° yaitu torsi 134.1727381 Nm, power turbin yang dihasilkan sebesar 1538.286 wat, efisiensi yang dihasilkan sebesar 56.97 % dan power elektrik yang dihasilkan sebesar 1230.63 wat

Dapat disimpulkan bahwa sudut pitch untuk menghasilkan torsi yang optimal didapatkan pada sudut pitch antara 10° dan 11° . Peningkatan sudut pitch pada penelitian ini yaitu dari 10° menjadi 11° menyebabkan penurunan yang besar pada koefisien tangensial sehingga mengakibatkan penurunan yang besar pada torsi rata-rata, power turbin, power elektrik dan efisiensi yang dihasilkan oleh turbin. Penambahan panjang chord pada penelitian ini yaitu dari 1.5 m menjadi 2 m menyebabkan penurunan pada koefisien tangensial namun tidak terlalu besar sehingga mengakibatkan penurunan pada torsi rata-rata, power turbin, power elektrik dan efisiensi yang dihasilkan oleh turbin yang tidak terlalu besar juga.

IV. KESIMPULAN

Dari analisa diatas, dapat disimpulkan bahwa :

1. Untuk memenuhi suplai daya pada daerah penelitian dibutuhkan vertical axis wind turbine sebanyak 19 buah.
2. Torsi rata-rata terbesar terdapat pada variasi panjang chord 1.5 m dengan sudut pitch 10° dan jumlah blade 4 buah dengan nilai 134.9452198 Nm, sedangkan torsi rata-rata terendah terdapat pada variasi panjang chord 2 m dengan sudut pitch 11° dan jumlah blade 3 buah dengan nilai 44.57426729 Nm.
3. Efisiensi terbesar terdapat pada variasi panjang chord 1.5 m dengan sudut pitch 10° dan jumlah blade 4 buah dengan nilai 57.29 %, sedangkan efisiensi terendah terdapat pada variasi panjang chord 2 m dengan sudut pitch 11° dan jumlah blade 3 buah dengan nilai 18.93%.
4. Penambahan jumlah blade menyebabkan peningkatan torsi rata-rata, power turbin, power elektrik dan efisiensi yang dihasilkan oleh VAWT.

5. Penambahan panjang chord memberikan penurunan torsi rata-rata, power turbin, power elektrik dan efisiensi yang dihasilkan oleh VAWT. Namun besarnya penurunan tersebut tidak terlalu besar.
6. Peningkatan sudut pitch menyebabkan penurunan yang besar pada koefisien tangensial, torsi rata-rata, power turbin, power elektrik dan efisiensi yang dihasilkan oleh VAWT. Sudut pitch untuk mendapatkan torsi yang besar pada penelitian ini didapatkan pada sudut pitch 10° .
7. Dapat disimpulkan bahwa sudut pitch untuk menghasilkan koefisien tangensial, torsi rata-rata, power turbin, power elektrik dan efisiensi yang optimal didapatkan pada sudut pitch antara 10° dan 11° .

SARAN

Saran yang dapat diberikan dari penelitian ini adalah :

1. Diperlukan pembuatan secara langsung untuk model maupun benda nyata dari VAWT ini guna mendapatkan nilai yang lebih valid.
2. Jumlah iterasi dan variasi diperbanyak untuk mendapatkan hasil yang maksimal.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Bapak Irfan Syarif Arief ,ST.MT, selaku dosen pembimbing atas arahan dan bimbingannya. Terima kasih kepada seluruh pihak yang telah membantu baik secara langsung maupun tidak langsung dalam penelitian ini sehingga Penelitian ini dapat diselesaikan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Miller, Steven D, 2008. *Lift, Drag and Moment of NACA 0015 Airfoil*, Thesis. Department of Aerospace Engineering-The Ohio State University.
- [2] Andrew Tendai, Zhuga, 2011. *Design of Alternative Energy System: A Self-Starting Vertical Axis Wind Turbine for Stand-Alone Application (charging batteries)*, Thesis. Department of Mechatronic Engineering-School of Engineering Sciences and Technology-Chinhoyi University of Technology.
- [3] Justin Carrigan, Travis, 2010. *Aerodynamic Shape Optimization of A Vertical Axis Wind Turbine*, Disertation. Department Aerospace Engineering-The University of Texas.
- [4] http://en.wikipedia.org/wiki/NACA_airfoil
- [5] https://id.wikipedia.org/wiki/Massa_jenis
- [6] *Guidelines for Design of Wind Turbines Second Edition*. DNV / Rise press, 2002. Copenhagen. Denmark.
- [7] Arif Afifudin, Mochamad, 2010. *Studi Experimental Performansi Vertical Axis Wind Turbine (VAWT) Dengan Variasi Desain Turbin*, Thesis. Jurusan Teknik Fisika-Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.
- [8] Castillo, Javier, 2011. *Small-Scale Vertical Axis Wind Turbine Design*, Thesis. Department Aeronautical Engineering-Tampere University of Applied Sciences.